

空気でっぼうの圧縮行程に関する検討

小 堀 則 夫*

この研究は、小学校3年の教材「空気でっぼう」についての指導資料を得るために行ったものである。玉のよく飛ぶ条件の一つである圧縮過程での筒内部の圧力の高まりと、その過程で関与する摩擦力について検討した。また、その結果をふまえて、空気の弾性に気づかせていくための学習指導上の留意点についても言及している。

1. はじめに

小学校第3学年の空気に関する学習では、閉じ込めた空気に力を加えることにより、空気には弾性があることを理解させるのがねらいである。従来から効果的な教具として空気でっぼうが取り扱われてきている。玉の飛び出す勢いと快い発射音は、児童にとって魅力的であり、興味・関心も高い。したがって、空気でっぼうを与えて十分に活動させながら、玉の飛び出す原因としての空気の弾性に気づかせていくという学習場面の構成は大切である。

しかし、その際、筒内部の圧力が体感できるほど高まらなかったり、遠くへ玉を飛ばそうとするあまり、一気にピストンを押し切ってしまう、空気の弾性に気づかないでしまうなど、空気でっぼうの構造上、あるいは取り扱い上の問題がいくつかある。

そこで、本研究では、空気でっぼうの原理をふまえた上で、空気の弾性を十分体感させるための取り扱い方を明らかにしていくことにした。

これまでに、玉を飛ばすための条件については理論的に解明されている¹⁾。また、圧縮・発射行程と玉の飛行についての報告がある²⁾。しかし、外部からピストンに加える力が筒内部の圧力にどのように関与して、前玉を飛ばすのか、という一連の関係については、実証的な研究がほとんどなされていない。

本研究では、前・後玉の動きと圧縮筒内の圧力変化、及び摩擦を考慮して、空気でっぼうに外部からする仕事と筒内部のエネルギーとの関係を実験を通して明らかにした。あわせて、効果的な操作方法を検討して、空気でっぼうの操作上の留意点についても考察したのでその結果を報告する。

2. 空気でっぼうの圧縮行程

空気でっぼうの基本的な原理は、筒内部の空気を圧縮し、その弾性によって前玉を飛ばすのであるが、その際、前玉と筒の間に摩擦がはたらいて筒内の圧力が十分高くなるまで動き出さず、いったん始動したら摩擦はできるだけ小さいことが大切である¹⁾。もちろん、空気もれが少ないほど圧力は高まりやすい。

*理科長期研修員（上越市立教育センター・上越市立南本町小学校）

以下、圧縮過程について(1)(2)で述べる。

(1) 空気でっほうに働く力と玉の動き

後玉がピストンに押されて空気を圧縮し、前玉が筒口から発射するまでの一連の過程を概観する（図1）。

① ピストンを押すことにより、後玉に力 F_1 が加えられる。後玉の静止摩擦力 f_0 を越えた時、後玉は始動する。それにともない筒内部の圧力 P が高まる。後玉の動摩擦力を f_1 とし、質量 m_1 の後玉が加速度 α_1 で動いていくものとする、このときの関係は、(1)式で与えられる。

$$F_1 = f_1 + P_{\text{全}} + m_1 \alpha_1 \cdots \cdots (1)$$

玉の質量が軽いものとする、(1)式は(2)式で示される。

$$F_1 = f_1 + P_{\text{全}} \cdots \cdots (2)$$

② その後、さらに筒内の圧力が高まる。

③ 全圧力 $P_{\text{全}}$ が前玉の静止摩擦力 f_0 を越えたとき、前玉が始動する。質量 m_2 の前玉が加速度 α_2 で動いているものとする、このときの関係は、(3)式で与えられる。

$$P_{\text{全}} = f_2 + m_2 \alpha_2 \cdots \cdots (3)$$

前玉は、このようにして筒口まで押されていって飛び出す。

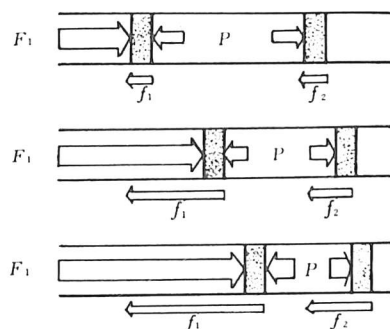


図1 空気でっほうに働く力と玉の動き

(2) エネルギー的考察

次に、この過程をエネルギー変換の視点から概観すると、後玉が始動してから前玉が飛び出すまでに次のような過程をたどる。

ピストンを押すことにより、後玉に外部から仕事 W_1 がなされると、後玉は筒内部の空気に仕事 W_5 をする。このとき、後玉の摩擦によってエネルギー W_2 が消費され、筒内に閉じ込められた空気の内部エネルギー W_4 を高める。閉じ込められた空気は前玉に仕事 W_3 をする。このとき、前玉に与えられたエネルギーの一部は前玉の摩擦として費やされ、他は運動エネルギー、音、熱などとなって失われる。

筒内の空気の内部エネルギー W_4 $[= W_1 - (W_2 + W_3)]$ を高めることは、発射後の前玉の運動エネルギーを大きくするための条件の一つであると考え、本研究では、発射筒・圧縮筒及び摩擦力 W_4 との関係を検討した。

なお、このとき、 $W_1 \sim W_5$ は、(4)～(8)で与えられる。（これらの具体的な算出法は、3⑥でも述べる。）ただし、後・前玉の変位を $\Delta x_1, \Delta x_2$ としたとき、摩擦によるエネルギー損失を $f_1 \Delta x_1, f_2 \Delta x_2$ 、筒内部を前玉が移動するときの運動エネルギーを KE 、筒内の空気の内部エネルギーを IE とする。

$$W_1 = f_1 \Delta x_1 + IE + f_2 \Delta x_2 + KE \cdots \cdots (4)$$

$$W_5 = f_2 \Delta x_2 + KE + IE \cdots \cdots (5)$$

$$W_3 = f_2 \Delta x_2 + KE \cdots \cdots (6)$$

$$W_2 = f_1 \Delta x_1 \cdots \cdots (7)$$

$$W_4 = IE \cdots \cdots (8)$$

3. 実験装置と方法

前玉の圧縮行程を解明するために、圧縮筒内の体積変化については図2の装置により前玉及び後玉の動きを同時に、連続的に記録した。また、前・後玉の動きにともなう筒内の圧力変化については空気でっぽうの筒に取りつけた3基のブルトン圧力計の指示値をそれぞれ連続的に記録して測定した。

以上の測定から、前・後の玉の移動にともなうエネルギー変換のようすを調べた。

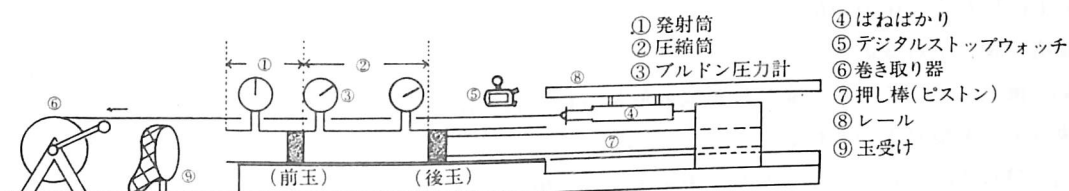


図2 実験装置

① 外力の測定：押し棒に取り付けたばねばかりを針金でひき、筒前方で巻き取りながらピストンを移動させた。また、ピストン及びばねばかりは、設定したレール上を一直線に移動させ、できるだけ一定の力がピストンに加わるようにした。（ばねばかりの慣性は考慮しなかった。）

② 時刻の測定：デジタルストップウォッチの表示を凸レンズで拡大して計測した。

③ 圧力の測定：圧力計（島津製）には圧力調節ネジ付のものをを用いた。なお、ブルドン圧力計の管内の空気の体積は考慮しなかった。

④ 連続写真撮影による記録：圧力、玉の移動距離、時刻を同時に記録するためにカメラ（ニコンF2、モータードライブ）及び、8mm撮影機（キャノン512XL）を使用した。なお、ガラス、アクリルパイプ部分の反射光を防ぐための偏光フィルターを使用した。

⑤ 使用した空気でっぽう：筒（シリンダー）には透明なアクリルパイプ（内径1.8cm、全長50cm）、玉には市販のウレタン玉（長さ1.5cm、質量0.52g）を用いた。

⑥ 算出法

W_1 （外部からなされる仕事）：ピストンの移動距離と、ばねばかりで読み取った力との積である。図3では二点破線以下の面積で表わされる。

W_5 （後玉が筒内部の空気になす仕事）：後玉の移動した距離と圧力計で測定した値から求めた全圧力との積である。図では実線以下の面積で表わされる。

W_3 （閉じ込められた空気が前玉になす仕事）：前玉が移動した距離

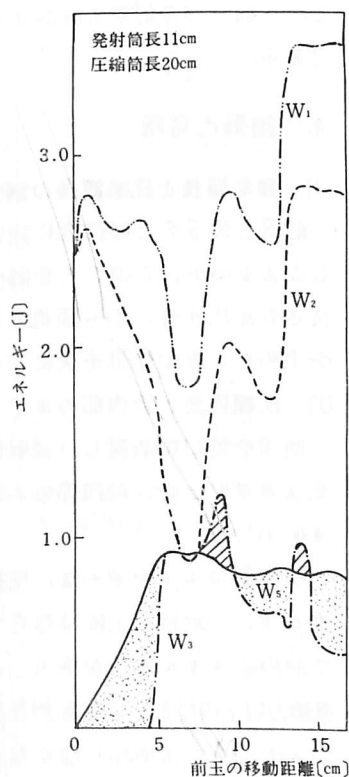


図3 エネルギー変換からみた圧縮行程

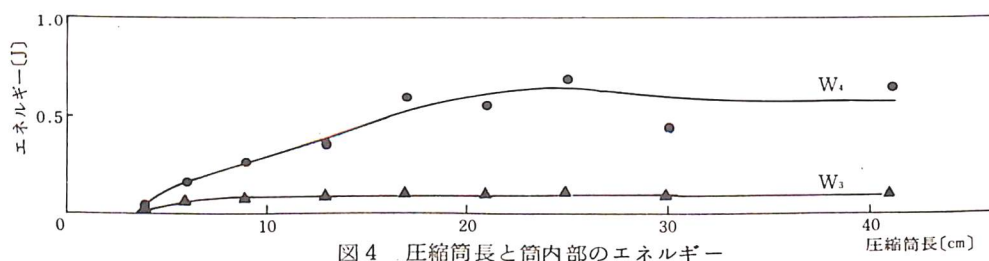


図4 圧縮筒長と筒内部のエネルギー

と前玉に加わる全圧力の積である。図3では、一点破線以下の面積で表わされる。

W_2 (後玉の摩擦によって失われるエネルギー) : $W_1 - W_5$ で破線以下の面積で表わされる。

W_4 (閉じ込められた空気の内エネルギー) : $W_5 - W_3$ で (■) の面積 - (▨) の面積で表わされる。

以下の実験によって算出したエネルギーは、後玉が始動してから前玉が発射する直前までのエネルギーを積算したものである。

4. 結果と考察

(1) 発射筒長と圧縮筒長の割合

前玉と後玉をどの位置に装着したとき、筒内部の圧力が最も高まるのか、このことを調べるために、発射筒と圧縮筒の長さを変化させ、(4)~(8)式よりそれぞれ筒内部のエネルギーを求めた。その結果を次に述べる。

① 圧縮筒長と筒内部のエネルギー

前玉を筒口に装置し (発射筒長 = 前玉の厚さ), 圧縮筒長を変化させたとき、筒内部のエネルギーを求め、その結果を図4に示した。

筒内部のエネルギーは、圧縮筒長が25cmまでは徐々に増加するが、一定値以上にはならなかった。これは、後玉によって筒内のエネルギーが増大し、全圧力が前玉にはたらく静止摩擦力以上になると、前玉が発射してしまい、それ以上筒内部のエネルギーは増加しなくなるためである。

したがって、この空気てっぽうの場合、筒内部の圧力を高めるためには、圧縮筒長は25cm以上必要ないといえる。

② 発射筒長と筒内部のエネルギー

圧縮筒長を一定 (25cm) とし、発射筒の長さを変化させ、

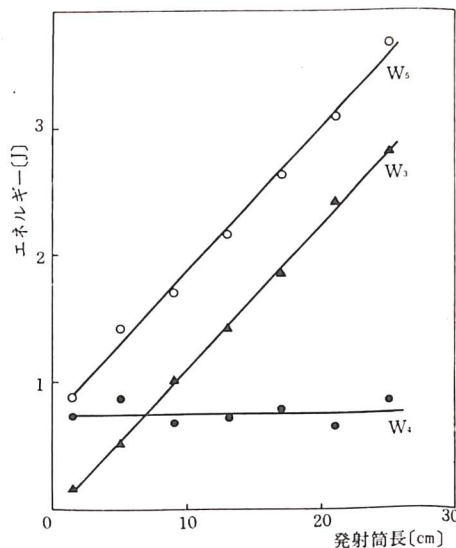


図5 発射筒長と筒内部のエネルギー

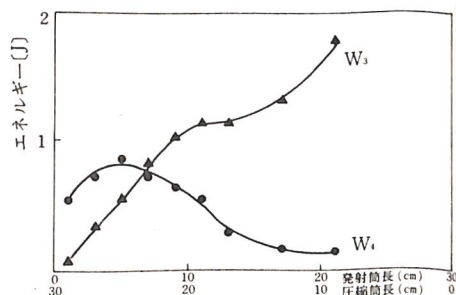


図6 発射筒長・圧縮筒長と筒内部のエネルギー

筒内部のエネルギーとの関係を求めて図5に示した。

発射筒を長くしていくにつれて、後玉が筒内部の空気になす仕事 W_6 は増加していき、前玉の摩擦によって失われるエネルギーもまた、それとともに増加することがわかる。

筒内部のエネルギーは、発射筒が約4 cmのところで最高値を示した。それ以後、発射筒だけを長くしても筒内部のエネルギーはほぼ一定値であった。

さらに玉の位置関係で考察すると、前玉はある圧力以上になると動き出すので、いくらピストンを押し込んでも筒内の空気がそれ以上圧縮されない状態に達する。このような状態では、一方で後玉を押すことにより、筒内部の空気を与えるエネルギーを増し、他方では前玉の移動で摩擦としてそれに近いエネルギーを失うことになる。したがって、圧縮筒が長くても筒内部のエネルギーはほぼ一定の値をとることになる。

③ 発射筒長・圧縮筒長と飛距離

全長が一定（30 cm）の筒で後玉の位置を決め、前玉の位置だけを移動させることによって、圧縮筒と発射筒の長さを変化させていったとき、筒内部のエネルギーとの関係を求め、その結果を図6に示した。

発射筒長4 cm（圧縮筒26 cm）付近で、筒内部のエネルギーはピークに達し、その後は徐々に減少している。

また、図7は全長30 cmの筒を用いて、筒の配分と前玉が実際に筒口から飛び出した時の飛距離（45 cmの高さから水平に撃ち出したときの筒口からの距離）との関係を示したものである。

図6、図7は同じ傾向を示していることから、筒内部のエネルギーを高めることが、発射後の運動エネルギーを大きくするためにいかに重要な条件かがわかる。

(2) 圧縮行程における摩擦力の役割

① 摩擦によって失われるエネルギーの割合

外部からなされる仕事 W_1 のうちで、前・後の玉の摩擦により失われるエネルギーの割合を比較して図8に示した。

どの場合も後玉の摩擦が前玉より大きい。また、前玉の摩擦で失われるエネルギーが占める割合が少ない場合は、逆に後玉の摩擦によるエネルギー損失の割合が大きく、両者を合計すると約90%を占める。したがって、残りの約10%が筒内部のエネルギー

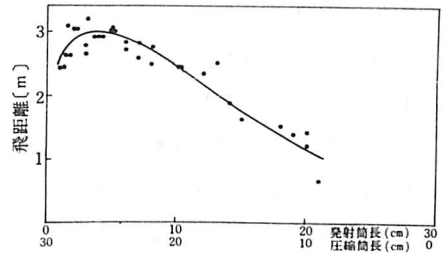


図7 発射筒長・圧縮筒長と飛距離

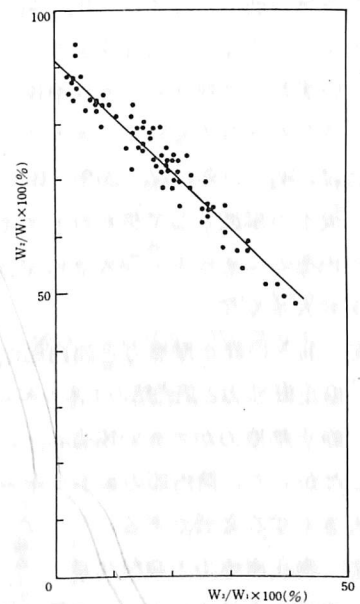


図8 摩擦によって失われるエネルギーの割合

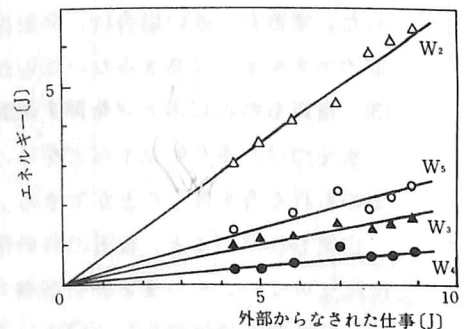


図9 外部からなされた仕事に占める割合

ルギーである。

なお、閉じ込められた空気が前玉になす仕事 W_3 の中には、前玉の摩擦によって失われるエネルギーと前玉の運動エネルギーが含まれているが、運動エネルギーは、たいへん小さな値であり、 W_3 のほとんどは前玉の摩擦とみなすことができる。(前玉の摩擦によって失われるエネルギー $=1.1\text{ J}$ に対して、前玉の運動エネルギー $=2.4 \times 10^{-5}\text{ J}$ であった。)

② 外部からなされた仕事 W_1 と後玉の摩擦によって失われたエネルギー W_2 、後玉が筒内部の空気になす仕事 W_5 、閉じ込められた空気が前玉になす仕事 W_3 、閉じ込められた空気の筒内部のエネルギー W_4 、との関係を図9に示した。

いずれも外部からなす仕事 W_1 と相関関係が認められた。

外部から与えられるエネルギー W_1 のうち、それぞれ占める割合は、 $W_2=71\%$ 、 $W_3=20\%$ 、 $W_4=9\%$ 、($W_5=29\%$ 、)であった。

後玉の摩擦として失われるエネルギーが極めて大きい。また、筒内部のエネルギーが大きい場合は、摩擦によるエネルギー損失も大きくなる。

③ 前玉の静止摩擦力と筒内部のエネルギー

静止摩擦力と筒内部のエネルギーとの関係を図10に示した。

静止摩擦力が大きい場合ほど、筒内部のエネルギーは大きい。したがって、筒内部のエネルギーを高めるには、静止摩擦力を大きくする必要がある。

④ 静止摩擦力と発射筒長

摩擦力を示す目安として静止摩擦力をとりあげ(静止摩擦力、は動摩擦力の大きさと対応するとして)、筒内部の圧力が最も高まる発射筒長(有効発射筒長)と摩擦力との関係を図11に示した。摩擦が小さい場合は、発射筒長を長くしなければ、筒内部のエネルギーは高まらないことがわかる。

(3) 空気もれとピストンを押す速度

水をつけた玉や野菜玉などをゆっくり押し込んでいくと、空気のもれる音を聞くことができる。

空気もれがあると、後玉の移動距離は増すが、筒内部の圧力は高まらない。そのまま静止摩擦力を越えることができれば、前後の玉は接近し、ついにはくっついてしまう。しかし、このようなことも、ピストンを速く押し切ることによって、圧

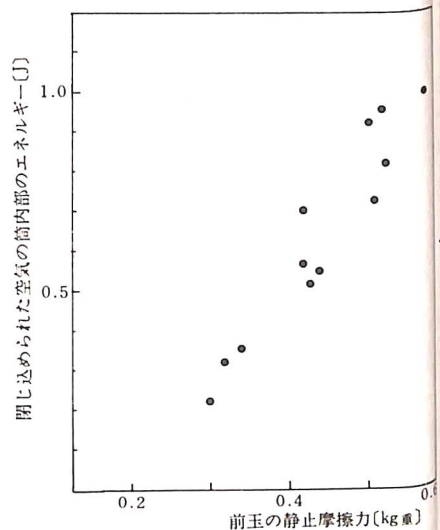


図10 静止摩擦力と筒内部のエネルギー

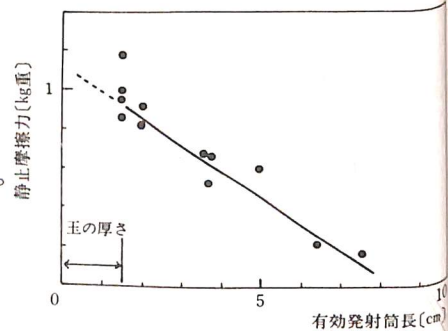


図11 静止摩擦力と発射筒長

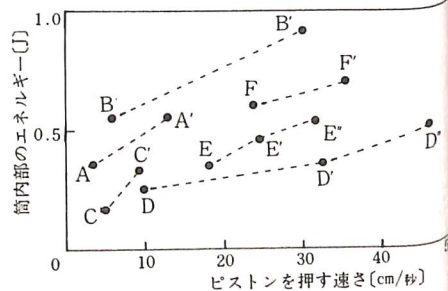


図12 ピストンを押す速さと筒内部のエネルギー

力を高め、空気もれの影響をある程度防ぐことができる。

ピストンを押す速さと筒内部のエネルギーとの関係を図12に示した。

圧縮・発射筒長が同一条件のものを比較すると、ピストンを速く押し込んだもののほど、筒内部のエネルギーは大きくなる。

5. 学習指導上の留意点

空気でっぼうを使って自由に玉を飛ばす活動をすすめるとき、児童は前・後の玉の位置関係が玉の飛び出す勢いと関係していることに気付いてくる。このとき閉じ込められた空気の弾性に十分気付かせるための指導上の留意点について述べる。

(1) 閉じ込められた空気の圧力を高めるために

① 圧縮筒：4の(1)①から前玉に静止摩擦力以上の圧力が加わると、前玉は発射してしまうので、あまり長い筒は必要でない。使用した空気でっぼう（直径1.8cm）では、25cmくらいあれば十分に圧力を高めることができた。

② 発射筒長：4の(1)②より、概して発射筒より圧縮筒の長い方が、筒内部のエネルギーを増すことができる。特に全長が短い場合には、できるだけ圧縮筒を長くする必要がある。

③ 発射筒長と摩擦力：4の(1)③より、前玉の摩擦力の大きさに応じて、発射筒長が決まってくる。ゆるい玉では、発射筒長を長くする必要がある。

しかし、一般には、発射筒長を玉の長さ程度でもよく、静止摩擦力が小さい場合には、やや長い発射筒であるとよい。押し棒は、筒の長さから玉の長さをさしひいたくらいか、それよりやや短くなる。

④ 玉の厚さ：4の(2)③から、前玉の静止摩擦力が大きいほど、筒内部のエネルギーは大きくなる。紙玉でっぼうなどでは、玉を水で潤滑するのは空気もれを防ぎ、さらに静止摩擦力を大きくすることに効果があるためである。

また、野菜玉が使用されるとき、玉の厚さが問題になる。そこでジャガイモ玉の長さを変化させたとき、それにともなう発射直前の筒内部のエネルギーの関係を図13に示した。

玉が長くなると静止摩擦力も大きくなり、筒内部のエネルギーも増すが、後玉の摩擦力も急激に増し、後玉の厚さが2cmになると最高で7.5kg重の力でピストンを押すことになり、児童の力では不可能である。逆に0.5cm以下の短い玉では、玉が変形したり、静止摩擦力が小

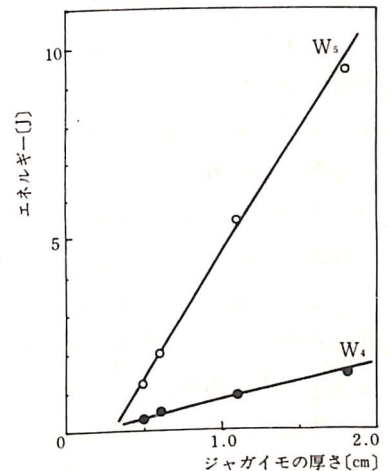


図13 玉の厚さと筒内部のエネルギー

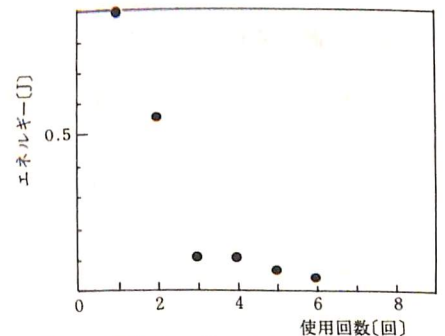
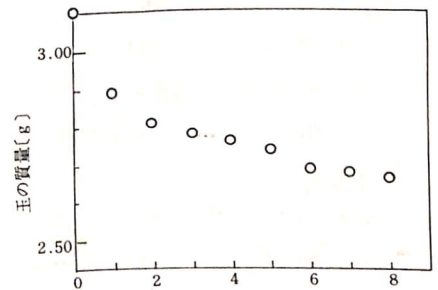


図14 野菜玉の使用回数と筒内部のエネルギー

さくて、圧力が高まらないうちに発射してしまう。このことから、ジャガイモ玉では1 cm前後の厚さが押す力も適当であり、圧力も十分に高めることができる。

(2) 空気の弾性に気づかせていくために

① 空気もれ：この実験では、空気もれをできるだけ少なくして圧力を十分高めることが大切である。図14は、野菜玉を使用した場合の使用回数と筒内部のエネルギーとの関係を示した。1回目には、筒内部のエネルギーは高まるが、2回目以後は急に減少する。

同じ玉を数回使用させることにより、空気もれが生じて玉が飛ばなくなることから、空気の存在に気づかせていくこともできる。

② ピストンを押す速さ：ピストンを速く押し込むほど、玉は速くへ勢いよく飛び出すという児童の意識は強い。確かに4の(3)で述べたように速く押し込むほど、圧縮筒内の圧力は高まるが、この実験のねらいは、空気の弾性に気づかせることである。したがって、2つの玉の動きに着目させるような手だてが講じられなければならない。その一つとして、押し棒の長さを制限する空気でっぼうを考え図15に示した。これにより、押し棒をあまり押し込まなくても、前玉が飛び出していくことに着目させ、空気の弾性に気づかせることができる。

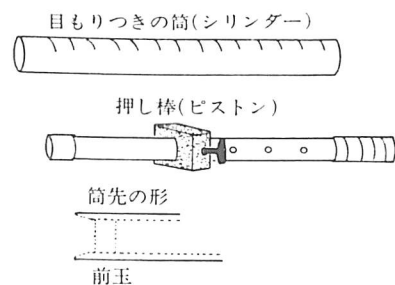


図15 押し棒の長さを制限する空気でっぼう

6. おわりに

圧縮行程については、エネルギー変換という視点から、その過程を示すことができた。なかでも、筒内部の圧力を高めるメカニズムについては、発射筒長・圧縮筒長及び摩擦力とのかかわりで、実験を通して明らかにすることができた。また、この結果をふまえて空気の弾性に気づかせていく指導の方向を示した。

今後はさらに、空気でっぼうの改良や活用方法について検討していきたい。また、空気もれ及び前玉の加速過程については今後の課題である。

参考文献

- 1) ロゲルギスト：物理の散歩道，岩波書店，95～102（1974）
- 2) 松田喜一郎：新潟県立教育センター研究報告，No 8，37～44（1976）